

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПОДЪЕМНОГО «КРАНА-ШАРА»

В. Н. ШАМАРДИНА^{1*}, В. В. ПИЛИПЕНКО²

¹ кафедра «Автоматизированные электромеханические системы», Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков, УКРАИНА

² Магдебургский Отто фон Герике университет, г. Магдебург, ГЕРМАНИЯ
*e-mail: verascha@i.ua

АННОТАЦИЯ. В труднодоступных местах выполнение транспортных и подъемных операций с грузами сопряжено, как правило, со значительными финансовыми расходами и представляет собой сложную инженерную задачу. Одним из вариантов ее решения может быть использование грузоподъемного крана-шара. Он представляет собой наполненный «легким» газом воздушный шар, снабженный системой тросов (строп) для подвеса груза к шару и соединения шара с тремя надежно закрепленными на грунте приводными электродвигателями, которые вращают барабаны с намотанными тросами. Цель работы состоит в выполнении математического описания и имитационного моделирования движения объектов электромеханической системы «кран-шар» с автоматизированным электроприводом, в оценке возможности обеспечения точного позиционирования груза при использовании электропривода постоянного тока с системой подчиненного регулирования. В рассматриваемой электромеханической системе перемещаемый груз имеет пять степеней свободы, динамические процессы описываются системой из пяти нелинейных дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода в соответствующих координатах. Линеаризация уравнений выполнена путем разложения в ряд Тейлора, ограничив представление нелинейностей первыми двумя членами ряда. Позиционирование шара и груза в пространстве обеспечивается путем изменения длин тросов, удерживающих шар. Поэтому при синтезе позиционной системы управления электроприводами барабанов были определены зависимости требуемых длин тросов в функции заданных координат шара (груза) в пространстве координат x, y, z . С учетом принятых допущений и требований ограничения колебаний груза получена достаточно сложная структурная имитационная модель, содержащая несколько вычислительных блоков, связанных между собой в соответствии с алгоритмом функционирования системы. Предложенная математическая модель объекта и проведенные в ходе структурного моделирования в среде Matlab исследования переходных процессов показали возможность решения задачи позиционирования груза путем использования трехконтурной системы подчиненного регулирования (контуров регулирования электромагнитного момента, частоты вращения двигателя и положения груза) для электроприводов барабанов с тросами, удерживающими шар.

Ключевые слова: грузоподъемный кран-шар; расчетные схемы; математическое описание; позиционирование груза; компьютерное моделирование.

MODELING THE POSITIONING PROCESS OF LIFTING «CRANE-BALLOON»

V. SHAMARDINA¹, V. PILIPENKO²

¹Department "Automated Electromechanical Systems", National Technical University "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

²Otto von Guericke Magdeburg University, Magdeburg, GERMANY

ABSTRACT In hard-to-reach places, the performance of transportation and lifting operations with cargo is usually associated with significant financial costs and is a complex engineering task. One of the solutions can be the use of a lifting crane. It is a balloon filled with "light" gas, equipped with a cable system (sling) for suspending the load on the ball and connecting the ball with three drive motors reliably fixed on the ground, which rotate the drums with wound cables. The purpose of the work is to perform a mathematical description and simulation of the movement of objects of the electromechanical system of a "crane ball" with an automated electric drive, to assess the possibility of ensuring accurate positioning of the load when using a direct current electric drive with a subordinate control system. In the electromechanical system under consideration, the relocatable load has five degrees of freedom; dynamic processes are described by a system of five nonlinear differential Lagrange equations of the second kind in the corresponding coordinates. The linearization of the equations is performed by expanding into a Taylor series, limiting the representation of nonlinearity to the first two members of the series. Positioning of the ball and the load in space is provided by changing the lengths of the cables holding the ball. Therefore, during the synthesis of the positional control system for the electric drives of the drums, the dependences of the required cable lengths were determined as a function of the given coordinates of the ball (load) in the x, y, z coordinate space. Taking into account the accepted assumptions and requirements for limiting the oscillations of the cargo, a rather complex structural simulation model was obtained, containing several computational units interconnected in accordance with the system operation algorithm. The proposed mathematical model of the object and transient processes carried out during the Matlab structural simulation showed the ability to solve the load positioning problem by using a three-loop subordinate control system (control loops for the electromagnetic momentum, engine rotational speed and load position) for electric drums with cables holding the ball.

Keywords: crane - ball; settlement schemes; mathematical description; cargo positioning; computer modeling.

© В. М. Шамардина, В. В. Пилипенко, 2019

Введение

В настоящее время практически ни одно строительство не обходится без грузоподъемных кранов. Их можно разделить на две группы: стационарные и передвижные (на базе кораблей, автомобилей и вертолетов). В труднодоступных местах, в условиях, когда нет дороги к строительной площадке, выполнение грузоподъемных операций часто осуществляется с использованием вертолета, что ведет к повышенным расходам. В этой ситуации выходом может служить наполняемый «легким» газом подъемный кран-шар (КШ), снабженный системой тросов (строп), обеспечивающих подвес груза к шару и соединение шара с надежно закрепленными на грунте приводными двигателями [1]. По сравнению с обычно используемыми мобильными кранами КШ универсален и компактен, имея одинаковые с ними ограничения на работу при ветре. Грузоподъемные КШ, производимые зарубежными компаниями, позволяют обеспечить подъем грузов (от 250 кг до 60000 кг и более) на значительную высоту, а также их транспортировку на заявленные заказчиком расстояния [2]. КШ находят применение при строительстве высотных зданий, башен, опор ветрогенераторов, в организации уникальных рекламных кампаний, в туристическом бизнесе.

Задача обеспечения точного позиционирования груза, транспортируемого КШ с использованием автоматизированного электропривода (АЭП), является актуальной.

Цель работы

Математическое описание и имитационное моделирование движения объектов электромеханической системы «КШ – АЭП», оценка возможности обеспечения точного позиционирования груза при использовании электропривода постоянного тока с системой подчиненного регулирования (СПР).

Изложение основного материала

При составлении математической модели в качестве расчетных принимаем схемы КШ, приведенные на рис.1 и рис.2.

На горизонтальной плоскости, исходя из углов равностороннего треугольника со сторонами l , в точках $M1-M3$ расположены барабаны с намотанными на них тросами. Приводные двигатели барабанов создают усилия $F1-F3$, которые передаются шару через абсолютно жесткие тросы длиной $l1...l3$. Шар, как материальная точка с массой $m1$, имеет координаты $(x;y;z)$. На тросе длиной $l0$ подвешен груз массой $m2$. На массы $m1$ и $m2$ действуют силы тяжести F_{G1} , F_{G2} , на воздушный шар $m1$ – еще и сила Архимеда F_A , обусловленная наличием «легкого» газа.

Система автоматического управления (САУ) двигателями осуществляет регулирование длины

строп, обеспечивая позиционирование шара и подвешенного к нему груза.

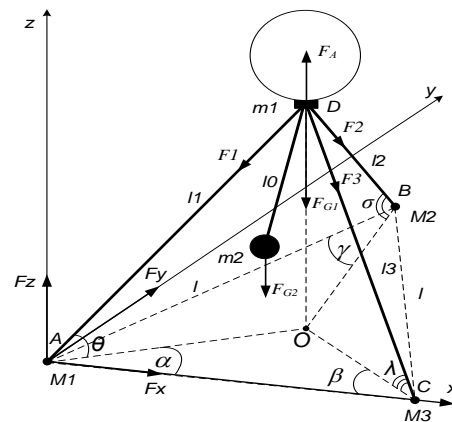


Рис. 1 – Расчетная схема КШ в системе координат xyz

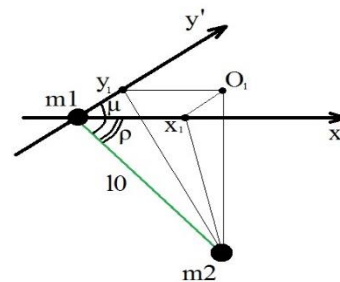


Рис. 2 – Подвес с грузом в координатной системе ρ

Математическое описание системы КШ выполнено при допущениях: канаты абсолютно жесткие; отсутствует вертикальное перемещение груза относительно шара; на шар не действуют внешние силы; диаметры барабанов с тросом остаются постоянными. КШ рассматривается как двухмассовая механическая система, динамические процессы в которой описываются системой из пяти дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода ($i=1, 2, \dots, 5$) соответственно в координатах $(x;y;z;\rho;\mu)$ [3, 4]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_q, \quad (1)$$

где q_i – обобщенная i -координата, \dot{q}_i – производная обобщенной i -координаты, Q_q – обобщенная сила, соответствующая обобщенной координате q_i , L – лагранжиан (функция Лагранжа), обычно определяется разностью кинетической E_k и потенциальной E_p энергий механической системы.

Кинетическая энергия масс $m1$ и $m2$ определяется по известной формуле:

$$E_{ki} = \frac{m_i V_i^2}{2}, \quad (2)$$

где V_i – скорость перемещения масс m_1 и m_2 .

В системе координат $(x; y; z)$ скорость шара: $V_1^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2$. Координаты груза $(x_1; y_1; z_1)$ связаны с системой координат шара (рис.2): $x_1 = x + l_0 \cdot \cos \rho$, $y_1 = y + l_0 \cdot \sin \mu$, при малых углах отклонения груза $z_1 \approx z - l_0$. Скорость движения груза: $V_2^2 = \dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 + \dot{z}_1^2$.

Потенциальная энергия шара: $E_{p1} = m_1 \cdot g \cdot z$, груза – $E_{p2} = m_2 \cdot g \cdot (z - l_0)$.

Функция Лагранжа: $L = E_{k1} + E_{k2} - E_{p1} - E_{p2}$.

Обобщенные силы с учетом (рис.1 и рис.2) определяются зависимостями:

$$\begin{aligned} Q_x = F_x &= -F_1 \cdot \cos \alpha \cdot \cos \theta + F_2 \cdot \sin(30^\circ - \gamma) \cdot \cos \sigma + F_3 \cdot \cos \beta \cdot \cos \lambda, \\ Q_y = F_y &= -F_1 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \theta + F_2 \cdot \cos(30^\circ - \gamma) \cdot \cos \sigma - F_3 \cdot \sin \beta \cdot \cos \lambda, \\ Q_z = F_z &= -F_1 \cdot \sin \theta + F_2 \cdot \sin \sigma - F_3 \cdot \sin \lambda + F_A, \quad (3) \\ Q_\rho &= -m_2 \cdot l_0 \cdot g \cdot \sin \rho, \\ Q_\mu &= -m_2 \cdot l_0 \cdot g \cdot \sin \mu, \end{aligned}$$

где F_x, F_y, F_z – проекции на координатные оси вектора-столбца \vec{F}_{123} сил F_1, F_2, F_3 (F_i , где $i=1,2,3$), создаваемых приводными двигателями при позиционировании шара, вектор-столбец $\vec{F}_{xyz} = K \cdot \vec{F}_{123}$, K – матрица коэффициентов передачи, g – ускорение силы тяжести, F_A – сила Архимеда.

$$F_A = g \cdot \rho_{\text{л}} \cdot V, \quad (4)$$

где $\rho_{\text{л}}$ – плотность «легкого» газа в шаре, V – объем шара.

Для расчета уравнений (3) с учетом рис.1 получим зависимости, отражающие изменения углов $\lambda, \alpha, \beta, \gamma$ в функции координат шара:

$$\begin{aligned} \lambda &= \arctg \frac{z}{(l-x)^2 + y^2}, \quad \alpha = \arctg \frac{y}{x}, \\ \beta &= \arctg \frac{y}{l-x}, \quad \gamma = 60^\circ - \arctg \left(\frac{l/2 - x}{\sqrt{3}/2 l - y} \right). \quad (5) \end{aligned}$$

Момент сопротивления на валу двигателей

$$M_i = F_i \cdot R_B, \quad (6)$$

где R_B – радиус барабана, на который наматывается трос.

Система (3) содержит нелинейные дифференциальные уравнения, их линеаризацию выполним путем разложения в ряд Тейлора, ограничив представление нелинейностей первыми двумя членами ряда. Кроме того, учитывая, что углы ρ и μ очень малы, принимаем $\sin(x) \approx x$ и $\cos(x) \approx 1$. Расчет производ-

ных в (1) выполнен с использованием пакета MuPAD, встроенного в MATLAB. После линеаризации и упрощений для рассматриваемой двухмассовой механической системы уравнения (3) принимают вид:

$$\begin{aligned} ddx &= (F_x - 2 \cdot m_2 \cdot Ro \cdot dx + m_2 \cdot Ro \cdot g) / m_1, \\ ddy &= (F_y - 2 \cdot m_2 \cdot Mu \cdot dy + m_2 \cdot Mu \cdot g) / m_1, \\ ddz &= (F_z - (m_1 + m_2) \cdot g + F_A) / (m_1 + m_2), \quad (7) \\ ddRo &= (2 \cdot Ro \cdot dx - Ro \cdot g - ddx) / l_0, \\ ddMu &= (2 \cdot Mu \cdot dy - Mu \cdot g - ddy) / l_0, \end{aligned}$$

где Mu, Ro – обозначение координатных углов μ и ρ (рис.2), dx, dy, dz – первая производная соответствующих координат x, y, z , $ddx, ddy, ddz, ddRo, ddMu$ – вторая производная соответствующих координат x, y, z, ρ, μ .

Позиционирование шара и груза обеспечивается путем изменения длин тросов, которые удерживают шар. Поэтому при синтезе позиционной системы управления электроприводами барабанов, на которые намотаны тросы, требуется установить, какую длину должны иметь удерживающие тросы для обеспечения заданных координат шара (груза) в пространстве x, y, z . Используя тригонометрические соотношения, для расчетной схемы КШ (рис.1) получим зависимости, связывающие длины тросов l_i ($i=1,2,3$) с координатами шара x, y, z :

$$\begin{aligned} l_1 &= \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}, \quad l_2 = \sqrt{(l/2 - x)^2 + (\sqrt{3}/2 l - y)^2 + z^2}, \\ l_3 &= \sqrt{(l - x)^2 + y^2 + z^2}. \quad (8) \end{aligned}$$

По приведенным соотношениям (8) в среде MATLAB разработан вычислительный блок имитационной модели, позволяющий по заданным x, y, z координатам шара определить допустимые длины тросов и, наоборот, по длине тросов установить координаты шара. Модель дополнена также блоком контроля сигналов задания координат, который не позволяет задавать недопустимые координаты шара.

Общая модель системы КШ-АЭП кроме выше перечисленных блоков, содержит блоки моделей электроприводов барабанов, а также модель линеаризованной в соответствии с (7) механической части системы КШ-АЭП. В формате статьи не представляется возможным в полном объеме привести структурную алгоритмическую схему, поэтому ограничимся только кратким описанием модели и полученных результатов моделирования.

При выполнении имитационного макета КШ-АЭП в качестве приводных использованы двигатели М1-М3 с постоянными магнитами типа ЕМГ30 (конструктивный коэффициент машины $K = 0,509$, индуктивность $L_a = 0,0034$ Гн, сопротивление якорной обмотки $R_a = 7,101$ Ом, момент инерции якоря $J = 0,00567$ кг·м²). Двигатели М1-М3 в модели пред-

ставлены типовой структурной алгоритмической схемой для случая неизменного потока возбуждения [5, 11, 12]. Они получают питание от широтно-импульсного преобразователя с частотой коммутации 10кГц, рассматриваемого при моделировании как апериодическое звено 1-го порядка с постоянной времени $T_\mu = 0,0001\text{с}$ и коэффициентом передачи $k=1$. Передаточные механизмы (барабан с тросом) представлены передаточной функцией:

$$W_M(s) = 2\pi R_E = \frac{li(s)}{\Omega(s)}, \quad (9)$$

где $\Omega(s)$ – угловая частота вращения вала двигателя.

Для управления приводными двигателями М1-М3 используем широко распространенную систему подчиненного управления [6-10] с задатчиками интенсивности для задающих сигналов, в которой контур тока (момента) с помощью ПИ-регулятора настроен на модульный оптимум, а в контурах скорости и положения используются ПИД-контроллеры Simulink. Результаты моделирования оптимизированной трехконтурной СПР при номинальной нагрузке приводного двигателя представлены на рис.3.

С учетом вышеприведенного и требований ограничения колебаний груза на подвесе в ходе моделирования была получена достаточно сложная структурная имитационная модель, содержащая несколько вычислительных блоков, связанных между собой в соответствии с алгоритмом функционирования системы КШ-АЭП [11-12]. На рис.4 – рис.6 представлены результаты моделирования при условии, что груз необходимо переместить в пространстве из положения с координатами (1; 0,3; 1) в положение с координатами (5; 3; 2). Начальные длины тросов $l_1...l_3$ приняты равными 3м, конечные значения – 9м.

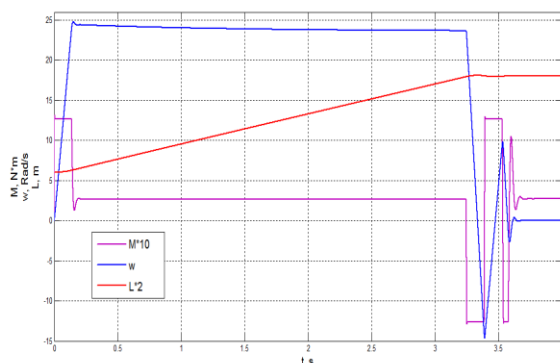


Рис. 3 – Переходные процессы в СПР

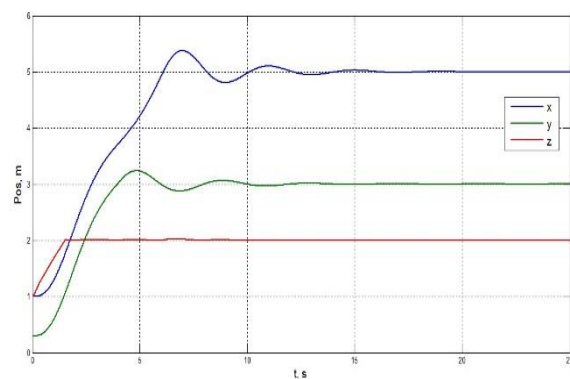


Рис. 4 – Позиционирование груза в пространстве $x-y-z$

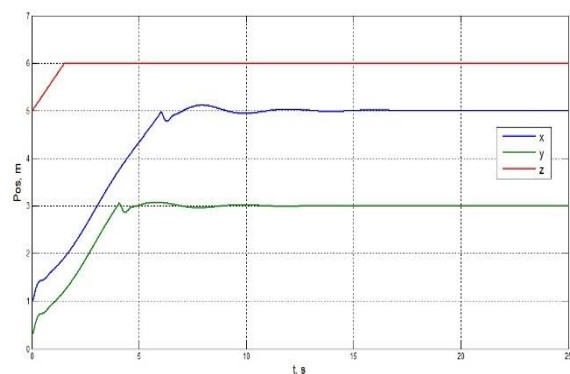


Рис. 5 – Перемещение шара в пространстве $x-y-z$

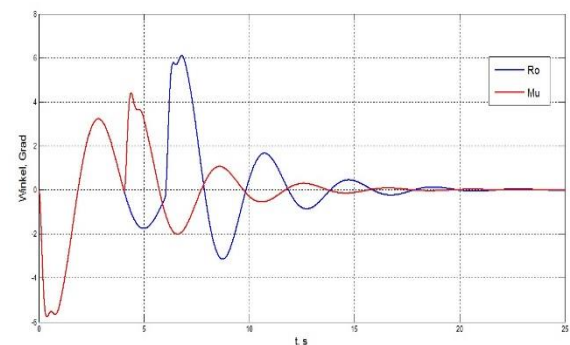


Рис. 6 – Колебания груза в системе координат $\rho-\phi$

Обсуждение результатов

Результаты моделирования показывают, что выполненная оптимизация контуров СПР обеспечивает перерегулирование в кривой переходного процесса частоты вращения приводных двигателей $\sigma < 4,3\%$, а также постоянную скорость изменения длины троса, что исключает рывки и позволяет избежать существенных колебаний груза (максимальный угол отклонения груза не превышает 6°). Проведенные эксперименты подтверждают возможность точного позиционирования груза в пространстве.

Выводы

В электромеханической системе подъемного воздушного «крана-шара» с приводными электродвигателями постоянного тока при жестком подвесе груз имеет пять степеней свободы. В такой системе представляется сложной задача обеспечения точного позиционирования груза в пространстве. Предложенное математическое описание объекта и проведенные в ходе структурного моделирования в среде Matlab исследования показали возможность решения задачи позиционирования груза путем использования трехконтурной СПР (контуров регулирования электромагнитного момента, частоты вращения двигателя и положения груза) для электроприводов барабанов с тросами, удерживающими шар.

Список литературы

1. **Официальный сайт CL CargoLifter GmbH & Co. KGaA** [Электронный ресурс] / фирма CL CargoLifter GmbH & Co. KGaA. – Берлин, 2019. – Режим доступа: <https://www.cargolifter.com/company/about-us>.
2. **Carl-Heinrich** Erstes voll funktionsfähiges CargoLifter Ballonkransystem ab September 2010/ Carl-Heinrich, Gablenz von Kesse, Christoph von Kessel // LifterNews, August. – 2010. – Dresden. – S. 8 – 11. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://d-nb.info/1011256479/34>.
3. **Беленький И. М.** Введение в аналитическую механику. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://stu.scask.ru/book_iam.php?id=30.
4. **Артемов И. И.** Применение уравнений Лагранжа второго рода для решения задач динамики: метод. указания / И. И. Артемов, В. Н. Плешаков, А. А. Елисеева. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – 30 с.
5. **Шамардіна В. М.** Аналіз та синтез лінійних систем автоматичного керування : лаб. практикум / В. М. Шамардіна, Л. В. Асмолова. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – 92с.
6. **Шрейнер Р. Т.** Системы подчиненного регулирования электроприводов: учеб. пособие/ Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2008. – 279 с.
7. **Габко В. В.** Системы керування електроприводами. Розрахунок системи підпорядкованого керування електроприводом постійного струму: навч. посібник / В. В. Габко, М. П. Розвудюк, В. В. Габко. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 89с.
8. **Симаков Г. М.** Системы автоматического управления электроприводами: учеб. пособие / Г. М. Симаков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 116 с.
9. **Терехов В. М.** Системы управления электроприводов. Академия, Москва, 2006. – 304 с.

10. **Тумаева Е. В.** Типы и параметры регуляторов системы управления позиционным сервоприводом / Е. В. Тумаева, Р. Р. Давлетов // Вестник технологического университета. – Нижнекамск: 2015. – Т.18, №16. – С.231 – 233.
11. **Чорний О. П.** Моделювання електромеханічних систем: підручник / Чорний О. П. – Кременчук, 2001. – 410 с.
12. **Черных И. В.** Моделирование электромеханических устройств в MATLAB, Simulink / Черных И.В. – М.: ДМК Пресс, СПб.: Питер. 2008. – 288с.

References (transliterated)

1. **Ofizialny site CL CargoLifter GmbH & Co. KGaA** [Электронный ресурс] / фирма CL CargoLifter GmbH & Co. KGaA. – Berlin, 2019. – Regim dostupa: <https://www.cargolifter.com/company/about-us>.
2. **Carl-Heinrich** Erstes voll funktionsfähiges CargoLifter Ballonkransystem ab September 2010/ Carl-Heinrich, Gablenz von Kesse, Christoph von Kessel // LifterNews, August. – 2010. – Dresden. – S. 8 – 11. – [Electrony resurs]. – Regim dostupa: <https://d-nb.info/1011256479/34>.
3. **Belenky I. M.** Vvedenie v analiticheskuyu mehaniku. [Electrony resurs]. – Regim dostupa: http://stu.scask.ru/book_iam.php?id=30.
4. **Artemov I. I.** Primenenie uravneniy Lagranga vtorogo roda dlja recheniya sadatsch dinamiki: metod. ukasaniya / I. I. Artemov, V. N. Plechakov, A. A. Eliseeva. – Krasnodar: KubGAU, 2013. – 30 s.
5. **Shamardina V. M.** Analis ta sintes liniynyh system avtomatytschnogo keruvannya: lab. praktikum / V. M. Shamardina, L. v. Asmolova. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2009. – 92s.
6. **Shreyner R. T.** Systemy podtschinennogo regulirovaniya elektroprivodov: otsheb. posobie/ R. T. Shreyner. – Ekaterinburg: Isd-vo GOU VPO «Ros. gos. prof.-ped. un-t», 2008. – 279 s.
7. **Grabko V. V.** Systemy keruvannya elektroprivodami. Rosrahunok systemy pidporyadkovanogo keruvannya elektroprivodjm postiyного strumu. Kursove ta dyplozne proektuvannya: navtsch. posibnyk/ V. V. Grabko, M. P. Rosvodyuk, V. V. Grabko. – Vinnyzya: VNTU, 2010. – 89s.
8. **Simakov G. M.** Systemy avtomatitscheskogo upravleniya elektroprivodami: yutsheb. posobie / G. M. Simakov. – Novosibirsk: Isd-vo NGTU, 2006. – 116 s.
9. **Terehov V. M.** Systemy upravleniya elektroprivodov. Akademiya, Moskva, 2006. – 304 s.
10. **Tumaeva E. V.** Tipy i parametry regulyatorov upravleniya systemy upravleniya pozizionnym servoprivodom / E. V. Tumaeva, R. R. Davletov // Vestnik tehnologitscheskogo universiteta. – Nignekamsk: 2015. – T.18, №16. – С.231 – 233.
11. **Tschorny O. P.** Modelyuvannya electromehanitschnyh system: pidrutschnik / Tschorny O. P. – Kremenchuk, 2001. – 410 s.
12. **Tschernyh I. V.** Modelyuvannya electromehanitschnyh ustroystv v MATLAB, Simulink / Tschernyh I. V. – M.: DMK Press, SPb.: Piter. 2008. – 288s.

Сведения об авторах (About authors)

Шамардіна Вера Николаевна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры «Автоматизированные электромеханические системы»; г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0002-9274-6517; e-mail: verascha@i.ua.

Vira Shamardina – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent/Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9274-6517; e-mail: verascha@i.ua.

Пилипенко Владимир Владимирович – студент, Магдебургский Отто фон Герике университет, г. Магдебург, Германия; e-mail: pilipenko1993@gmail.com.

Vladimir Pilipenko – student, Otto von Guericke Magdeburg University, Magdeburg, Germany; e-mail: pilipenko1993@gmail.com.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Шамардина, В. Н. Моделирование процесса позиционирования подъемного «крана-шара» / **В. Н. Шамардина, В. В. Пилипенко** // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 161-166. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.23.

Please cite this article as:

Shamardina, V., Pilipenko, V. Modeling the positioning process of lifting “crane –balloon”. *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Electric machines and electromechanical energy conversion.* – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2019, **20** (1345), 161-166, doi:10.20998/2409-9295.2019.20.23.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Шамардіна, В. М. Моделювання процесу позиціонування підйомного «крана - кулі» / **В. М. Шамардіна, В. В. Пилипенко** // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: "Електричні машини та електро механічне перетворення енергії". – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 161-166. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.23.

АНОТАЦІЯ. У важкодоступних місцях виконання транспортних і підйомних операцій з вантажами пов'язане, як правило, зі значними фінансовими витратами і є складною інженерною задачею. Одним з варіантів її вирішення може бути використання вантажопідйомного крана-кулі. Він являє собою наповнений «легким» газом повітряну кулю, що забезпечена системою тросів (строп) для підвісу вантажу до кулі і з'єднання кулі з трьома надійно закріпленими на ґрунті приводними електродвигунами, які обертають барабани з намотаними тросами. Мета роботи полягає у виконанні математичного опису та імітаційного моделювання руху об'єктів електромеханічної системи «крана-кулі» з автоматизованим електроприводом, в оцінці можливості забезпечення точного позиціонування вантажу при використанні електроприводу постійного струму з системою підпорядкованого регулювання. У розглянутій електромеханічній системі вантаж, що переміщується, має п'ять ступенів свободи, динамічні процеси описуються системою з п'яти нелінійних диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду у відповідних координатах. Лінеаризація рівнянь виконана шляхом розкладання в ряд Тейлора при обмеженні уявлення нелінійностей першими двома членами ряду. Позиціонування кулі і вантажу в просторі забезпечується шляхом зміни довжин тросів, що утримують кулю. Тому при синтезі позиційної системи керування електроприводами барабанів були визначені залежності необхідних довжин тросів в функції заданих координат кулі (вантаж) в просторі координат x, y, z . З урахуванням прийнятих припущень і вимог обмеження коливань вантажу отримана досить складна структурна імітаційна модель, яка містить кілька обчислювальних блоків, пов'язаних між собою відповідно до алгоритму функціонування системи. Запропонована математична модель об'єкта і проведені в ході структурного моделювання в середовищі Matlab дослідження перехідних процесів показали можливість вирішення завдання позиціонування вантажу шляхом використання системи підпорядкованого регулювання з трьома контурами (конттури регулювання електромагнітного моменту, частоти обертання двигуна і положення вантажу) для електроприводів барабанів з тросами, які утримують кулю.

Ключові слова: вантажопідйомний кран-куля; розрахункові схеми; математичний опис; позиціонування вантажу; комп'ютерне моделювання

Надійшла (received) 12.07.2019